



TITLE:

QCD相図の非一様カイラル相転移
におけるクォーク質量および量子-
熱揺らぎの効果について(
Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

柄澤, 真太朗

CITATION:

柄澤, 真太朗. QCD相図の非一様カイラル相転移におけるクォーク質量
および量子-熱揺らぎの効果について. 京都大学, 2016, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19490>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2018-07-
05に公開

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	柄澤 真太郎
論文題目	QCD相図の非一様カイラル相転移における クォーク質量および量子・熱ゆらぎの効果について		
(論文内容の要旨)			
<p>柄澤真太郎氏による本申請論文では、量子色力学 (QCD) における有限温度・密度での代表的な相転移の一つであるカイラル相転移において、秩序変数が空間的に変調した非一様カイラル相転移についての理論的研究が展開されている。</p> <p>申請論文では、非一様カイラル相研究の現状の概説の後、外部磁場が非一様カイラル相に与える特異な性質が明らかにされている。非一様カイラル相の秩序変数の関数形はいくつかのものが提案されているが、磁場が存在するときには二重カイラル密度波 (DCDW) 状態と呼ばれる相が最も優位になることが平均場近似のもとで示されている。そこでは、カイラル量子異常と呼ばれる QCD の位相幾何学的な性質が重要な役割を果たすことも明らかにされている。</p> <p>次に、非一様カイラル相転移に対するクォーク質量の効果が平均場近似の下で解析されている。柄澤氏は DCDW 状態を典型的な場合として取り上げて平均場近似および変分法で解析している。まず、クォーク質量が有限の場合、秩序変数の空間依存性はサイナーゴルドン方程式により記述され、秩序変数の空間依存性が楕円関数で与えられることが示されている。さらに、臨界温度・密度付近においてクォーク質量の効果により秩序変数の関数形が顕著に変化することが示され、さらに、相転移の次数が一次になることが示唆されている。</p> <p>申請論文の中心部分は、非一様カイラル相転移での平均場近似を越えたゆらぎの効果を取り入れた研究であり、他の分野で開発された複数の手法を結合させて、カイラル対称性が回復した通常相から非一様カイラル相への相転移点近傍における量子的・熱的ゆらぎの効果をリング近似の下で同時に取り入れた解析を行っている。具体的には、クォークの自由度を積分して秩序変数で書かれている実効的な熱力学ポテンシャルを導出し、二次および四次の項の係数に非一様相転移に特有の異常な寄与が現れることを見出している。申請者はこの異常な寄与の高次補正の足し合わせも実行し、閉じた表式を与えている。その表式の解析から、二次の係数は決して零になることはないことを示し、ゆらぎによって二次相転移が禁止されることを示している。また同時に、四次の項の係数はゆらぎにより符号を変えることも見出している。これは非一様カイラル相転移がゆらぎの効果により一次相転移になることを意味する。申請者は、このような定性的な理解を示すだけでなく、数値計算による定量的な評価も行い、相転移線を相図の中に具体的に求めている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

有限温度・有限密度における量子色力学 (QCD) に基づく物質の様々な相を明らかにする研究は原子核物理の現代的な課題のひとつになっており、理論および観測も含めた実験両面から活発な研究が行われている。QCD における有限温度および密度での相転移としては、天然に存在する物質の質量の起源に密接に関係したカイラル相転移と QCD を記述するクォークやグルーオンが漸近状態では存在せず現実にはそれらの複合粒子であるハドロンのみが存在することに関係した「閉じ込め-非閉じ込め相転移」がよく知られている。柄澤真太郎氏による本申請論文では、QCD における有限温度・密度でのカイラル相転移において最近注目を浴びている問題、すなわち、秩序変数が空間的に変調した非一様カイラル相転移が起こる可能性、相転移後の状態、特に、臨界点付近の構造についての理論的研究が展開された。その中で、柄沢氏は非一様カイラル相転移に対するクォーク質量の効果と量子的および熱的な揺らぎの効果について世界に先駆けた研究を行った。

柄澤氏は非一様カイラル相のうち二重カイラル密度波 (DCDW) 状態を典型的な場合として取り上げて平均場近似および変分法を用いて有限のクォーク質量の効果解析した。その結果、クォーク質量が有限の場合、秩序変数の空間依存性はサイナーゴルドン方程式により記述されること、したがって、秩序変数の空間依存性がその解として楕円関数で与えられることを明らかにした。さらに、臨界温度・密度付近においてクォーク質量の効果により秩序変数の関数形が顕著に変化することを具体的に示した。非一様カイラル相転移の次数は様々議論されているが、クォークの有限質量項かにより相転移の次数が一次になり得ることを初めて示した。

柄澤氏のより重要な貢献は、非一様カイラル相転移での平均場近似を越えたゆらぎの効果を取り入れた研究であると言える。柄沢氏は、広い視野に基づき、他分野で開発された複数の手法を結合させて相転移点近傍における量子的・熱的ゆらぎの効果リング近似の下で同時に取り入れた解析を世界で初めて行った。一般に、相転移点付近でのゆらぎの効果は重要で多くの研究がなされているが、秩序変数が空間依存性を持つ場合は特有の複雑さがあり、リング近似の下であれ、量子的・熱的ゆらぎの効果と同時に取り入れた解析をやり遂げた申請者の力量は大いに評価できる。

さらに導出した実効的な熱力学ポテンシャルの解析から二次および四次の項の係数に非一様相転移に特有の異常な寄与が現れることを精緻な解析により示し、非一様カイラル相転移がゆらぎの効果により一次相転移になることを世界で初めて明らかにしたことの意義は大きい。

このように本申請論文は、QCD における有限温度および密度における可能な相転移である非一様カイラル相転移についての重要な理論的貢献であると言える。

さらに申請論文は、この分野の歴史的な発展が、豊富な参考論文を引用しながら、論理的に明解なかたちで要領よく解説されており、今後この分野に参入する研究者にとっても有益なものになっている。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 1 月 15 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降